

Ю. И. БЫЧКОВ, Ю. Д. КОРОЛЕВ, Г. А. МЕСЯЦ, А. П. ХУЗЕЕВ

ПЛАЗМЕННЫЙ РЕАКТОР НА ОСНОВЕ СТАЦИОНАРНОГО ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО ПУЧКОМ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

(Представлено академиком В. И. Попковым 8 VII 1974)

При изучении плазмохимических реакций и создании плазмотронов применяются различные разряды, генерирующие неравновесную плазму: коронный, барьерный, тлеющий, высокочастотный и др. (¹⁻³). Важной проблемой является получение больших объемов плазмы с заданными параметрами (электронная и газовая температура, концентрация заряженных частиц, давление и т. д.), кроме того, существенна и мощность, выделяемая в разряде, поскольку во многих случаях скорость выхода продуктов реакции определяется именно мощностью. В названных типах разрядов практически невозможно совместить весь комплекс указанных требований.

Проблема может быть решена с помощью применения так называемых вынужденных разрядов, где плазма создается внешним ионизатором, например, пучком быстрых электронов, ионизирующих газ. Ранее проводилось изучение импульсных (⁴⁻⁶) и квазистационарных (⁷) разрядов такого типа применительно к CO_2 -лазерам. В настоящей работе приводятся результаты исследования стационарного разряда атмосферного давления в потоке газа, возбуждаемого непрерывно действующим пучком электронов.

Схема установки показана на рис. 1. Стационарный электронный пучок с энергией 200—250 кэВ и плотностью тока $j_n = 10-50$ мка/см² формировался в ускорителе и инжектировался через титановую фольгу

в направлении анода газоразрядного промежутка. Размеры выходного окна и анода $h \times l = 1 \times 4$ см², где h — размер в направлении протока газа. Продувка производилась через канал сечением 6×6 см² из баков, предварительно наполненных до 10—20 атм; скорость прокачки можно было регулировать в пределах $v_{пр} = 10-100$ м/сек. При скоростях протока до 20 м/сек применялась также прокачка замкнутого типа. Питание промежутка осуществлялось от источника постоянного напряжения (в.и.) $U = 20$ кв. Максимальная мощность, выделяемая в разряде, составляла 20 квт.

Принцип возбуждения несамостоятельного разряда заключается в следующем. Электроны пучка, проходя через фольгу, ионизируют газовый промежуток и создают газоразрядную плазму. Приложенное электрическое поле определяет электронную температуру и ток разряда. Предотвращение нагрева газа и связанного с этим дугового разряда обеспечивается за счет протока газа так, чтобы за характерное время образования дуги нагретый газ успевал полностью покинуть разрядную зону. При этом естественно подразумевается, что мощности, выделяемые в разряде, велики и охлаждение осуществляется лишь за счет смены газа, а эффекты тепло-

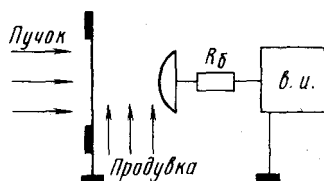


Рис. 1. Схема установки для получения стационарного объемного разряда. R_b — балластное сопротивление, в.и. — высоковольтный источник

проводности несущественны. Экспериментально нами реализованы такие режимы разряда при удельных мощностях до $1,5 \text{ квт/см}^3$ и при суммарной до 20 квт.

На рис. 2, 3 представлены вольт-амперные характеристики разряда в устойчивом безыскровом режиме. Визуальные наблюдения показали, что разряд имеет объемный характер. Свечение внутри промежутка равномерное, а вблизи электродов наблюдаются области повышенной яркости, которые выносятся в сторону потока.

Механизм проводимости промежутка в исследуемом диапазоне условий подобен механизму проводимости тлеющего разряда. Концентрация электронов, определяемая мощностью ионизатора, достаточно высока, так что

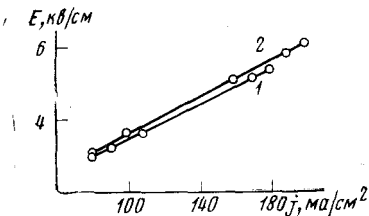


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда в азоте при атмосферном давлении и различных скоростях прокачки (м/сек): 1 — 50, 2 — 75; $j_{\text{н}} = 10 \text{ мкА/см}^2$, $h = 1 \text{ см}$

электрическое поле вблизи электродов существенно увеличивается и прикатодная область служит эмиттером электронов в положительный столб разряда. Проводимость определяется равновесной концентрацией электронов в положительном столбе, которая находится из уравнения баланса.

$$\frac{dn}{dt} = \psi - \beta n^2 - Nn\eta,$$

где n , N — концентрация электронов и атомов, β — коэффициент рекомбинации, η — коэффициент прилипания,

$$\psi = \frac{j_{\text{н}}}{e} \langle \sigma \rangle N,$$

ψ — скорость ионизации быстрыми электронами, $\langle \sigma \rangle$ — среднее сечение ионизации, e — заряд электрона.

Для азота можно положить $\eta = 0$ и тогда $n = (\psi/\beta)^{1/2}$. Из вольт-амперных характеристик концентрация электронов находится как $n = j/(ev)$, v — дрейфовая скорость. Отсюда можно определить коэффициент рекомбинации. Полученное значение $\beta \approx 10^{-7} \text{ см}^3/\text{сек}$ соответствует известным значениям коэффициента диссоциативной электрон-ионной рекомбинации.

Ток разряда в промежутке не зависит от скорости прокачки, поскольку время установления стационарного состояния намного меньше, чем время пролета газом разрядной зоны (рис. 2). При увеличении скорости прокачки увеличивается удельная мощность, при которой разряд сохраняет объемный характер. Это связано с более эффективным охлаждением разрядной области. Одним из параметров, характеризующих устойчивость разряда, является энергия, выделяемая на единицу массы продуваемого газа. Полученные в экспериментах значения этого параметра $W/m = 100-150 \text{ Дж/г}$, по-видимому, близки

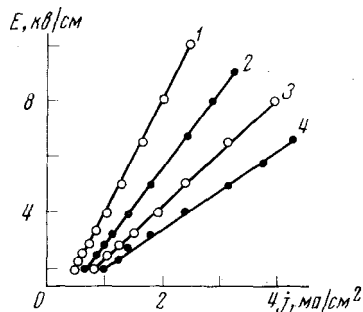


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики разряда на воздухе при различных токах пучка (мкА/см^2): 1 — 10, 2 — 15, 3 — 20, 4 — 25; $v_{\text{пд}} = 20 \text{ м/сек}$, $h = 2 \text{ см}$

к предельным для такого типа разряда. Устойчивость разряда также определяется и напряженностью приложенного поля. Замечено, что при увеличении напряженности величина W/m уменьшается. В электроотрицательных газах определяющую роль в балансе носителей определяют потери электронов за счет прилипания к нейтральным молекулам. За счет этого ток разряда в воздухе примерно на два порядка меньше, чем в чистом азоте (рис. 3).

Таким образом, стационарный разряд, поддерживаемый пучком электронов, обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными, применяемыми в плазмохимии. Практически отсутствует ограничение на мощность, выделяемую в единице объема газоразрядной плазмы; она может увеличиваться за счет увеличения скорости потока газа. Имеется возможность независимой регулировки электронной температуры (за счет изменения электрического поля), электронной плотности (за счет изменения мощности ионизатора), газовой температуры (за счет изменения скорости потока газа).

Институт оптики атмосферы
Сибирского отделения Академии наук СССР
Томск

Поступило
5 VII 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Ф. Мак-Таггарт, Плазмохимические реакции в электрических разрядах, М., 1972. ² Химия и физика низкотемпературной плазмы. Тр. I межвузовской конфер. по химии и физике низкотемпературной плазмы, М., 1971. ³ Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы, под ред. Л. С. Полака, «Наука», 1971. ⁴ В. М. Ковальчук, Г. А. Месяц, Ю. Ф. Поталицын, Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 6 (1971). ⁵ Ю. И. Бычков, Ю. Д. Королев и др., ЖТФ, т. 44, в. 4 (1974). ⁶ Н. Г. Басов, Э. М. Беленов и др., ЖТФ, т. 42, в. 12 (1972). ⁷ Е. П. Велихов, С. А. Голубев и др., ЖЭТФ, т. 65, в. 2 (8) (1973).